

2339/1.2008 PCT

10/554074

Rec'd PCT/PT 20 OCT 2005

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
4. November 2004 (04.11.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2004/095552 A3

(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: H01L 21/20

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2004/000736

(22) Internationales Anmeldedatum:  
8. April 2004 (08.04.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
103 18 283.7 22. April 2003 (22.04.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH [DE/DE]; Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): MANTL, Siegfried [AT/DE]; Tilgenkampstrasse 17, 52428 Jülich (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH; Fachbereich Patente, 52425 Jülich (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht  
— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eintreffen

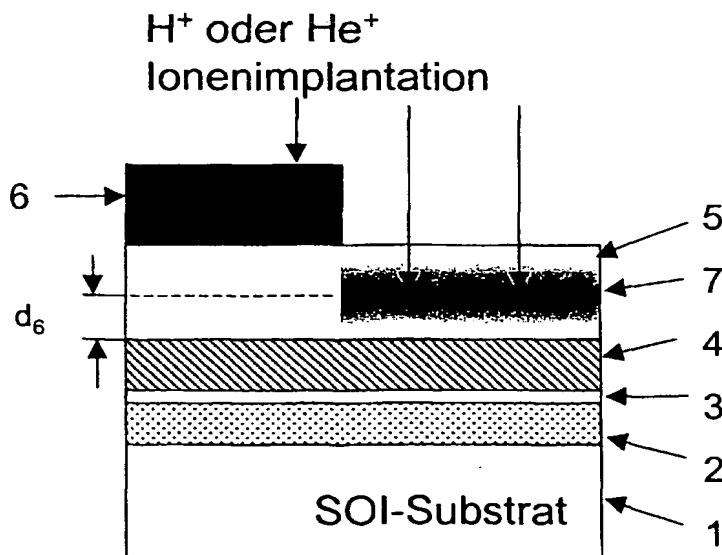
(88) Veröffentlichungsdatum des internationalen

Recherchenberichts: 2. Dezember 2004

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR PRODUCING A TENSIONED LAYER ON A SUBSTRATE, AND A LAYER STRUCTURE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINER VERSPANNTEN SCHICHT AUF EINEM SUBSTRAT UND SCHICHTSTRUKTUR



(57) Abstract: The invention relates to a method for producing a tensioned layer on a substrate involving the following steps: producing a defect area in a layer adjacent to the layer to be tensioned, and; relaxing at least one layer adjacent to the layer to be tensioned. Additional layers can be epitaxially deposited. Layer structures formed in this manner are advantageously suited for components of all types.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer verspannten Schicht auf einem Substrat mit den Schritten: Erzeugung eines Defektbereichs in einem zu der zu verspannenden Schicht benachbarten Schicht; Relaxation mindestens einer zu der zu verspannenden Schicht benachbarten Schicht. Es können epitaktisch weitere Schichten angeordnet werden. Derartig gebildete Schichtstrukturen sind vorteilhaft geeignet für verschiedenartigste Bauelemente.

WO 2004/095552 A3

WO 2004/095552 A3



*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

## B e s c h r e i b u n g

Verfahren zur Herstellung einer verspannten Schicht auf  
einem Substrat und Schichtstruktur

---

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung  
einer verspannten Schicht auf einem Substrat, sowie  
5 eine Schichtstruktur.

Die rasch fortschreitende Nanoelektronik erfordert stetig schnellere Transistoren, insbesondere metal oxide field effect transistors (MOSFETs). Eine Leistungssteigerung wird in der Regel durch Verkleinerung der Transistordimensionen erzielt. Dies ist aber sehr aufwendig und teuer, da die Schlüsseltechnologien der Chip-Herstellung, wie die Lithographieverfahren und die Ätzverfahren durch leistungsfähigere Systeme ersetzt werden müssen.

Ein alternativer Weg ist die Verwendung von leistungsfähigeren Materialien. Anstelle von gewöhnlichen Silizium Substraten werden zunehmend häufiger sogenannte silicon on insulator (SOI) Substrate verwendet. Dabei befindet sich unter einer einkristallinen Siliziumoberflächenschicht eine vergrabene Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) Schicht mit Isolationseigenschaft. Elektronische Bauelemente, insbesondere MOSFETs (metal oxide silicon field effect transistors), zeigen auf SOI-Substraten schnelleres Schaltverhalten und geringere Verlustleistungen. Diese Substrate sind kommerziell erhältlich und werden entweder durch Ionenimplantation von Sauerstoff in Silizium und Tempern (sogenannter SIMOX-Prozess;

SIMOX Wafer) oder mittels Verbinden (Bonden) von zwei oxidierten Wafern und Abspalten oder Zurückätzen eines Teils des zweiten Wafers (sogenanntes Waferbondverfahren) erzeugt. Man bezeichnet so hergestellte Wafer als  
5 BESOI-Wafer (bonded and etch back-SOI).

Es bietet sich auch der Einsatz von verspanntem Silizium, verspanntem Silizium-Germanium Legierungen (Si-Ge) bzw. Silizium-Kohlenstoff (Si-C) und Silizium-Germanium-Kohlenstoff (Si-Ge-C) an. Die Verwendung von  
10 Silizium bzw. Si-Ge, Si-C oder Si-Ge-C in einem bestimmten elastischen Verzerrungszustand verbessert die Materialeigenschaften, insbesondere die für Bauelemente eminent wichtige Ladungsträgerbeweglichkeit der Elektronen und Löcher. Der Einsatz dieser und anderer höherwertigen Materialien erlaubt eine erhebliche Performan-  
15 cesteigerung von Si-basierenden Hochleistungsbauelementen, wie MOSFETs und MODFETs, ohne die kritischen Strukturgrößen der Bauelemente verkleinern zu müssen. Solche elastisch verspannten Schichtsysteme setzen al-  
20 lerdings epitaktisches Wachstum auf speziellen Substraten, bzw. auf spannungsrelaxierten Schichten, sogenannten virtuellen Substraten voraus, deren Herstellung mit geringer Defektdichte sehr aufwendig und schwierig ist (F. Schaeffler, Semiconductor Sci. Techn. 12 (1997) p.  
25 1515-1549).

Häufig wird nämlich die Herstellung einkristalliner Schichten durch das zur Verfügung stehende Substratmaterial stark begrenzt, bzw. die Qualität der Schichten vermindert. Unterschiedliche Kristallstrukturen, sowie  
30 unterschiedliche Gitterparameter zwischen einem Sub-

strat und einem Schichtmaterial (Gitterfehlanpassung) verhindern in der Regel ein einkristallines Wachstum von Schichten hoher Qualität. Werden bei nicht angepassten Gitterparametern einkristalline Schichten abgeschieden, so hat dies zur Folge, dass diese anfangs mechanisch verspannt aufwachsen, das heißt deren Gitterstruktur unterscheidet sich in diesem Zustand von der eigenen bzw. der des Substrats. Überschreitet die abgeschiedene Schicht die sogenannte kritische Schichtdicke, so wird die mechanische Spannung durch Versetzungsbildung abgebaut und die Gitterstruktur kommt der eigenen bzw. der des Substrats näher. Diesen Prozess nennt man Spannungsrelaxation, im folgenden Relaxation genannt. Dabei bilden sich an der Grenzfläche sogenannte Gitterfehlanpassungsversetzungen (Misfit-Versetzungen) und in der relaxierten Schicht Fadenversetzungen (threading dislocations), die von der Oberfläche bis zur Grenzfläche laufen. Die Misfit-Versetzungen sind für die Spannungsrelaxation erforderlich, degradieren aber nicht die darüber liegende Schicht. Ab einer gewissen Gitterfehlanpassung (ca. > 0,5%) wird die Fadenversetzungsdichte so hoch, dass solche Schichten für Bauelemente ungeeignet sind. Im allgemeinen kann durch eine Temperaturbehandlung diese Fadenversetzungsdichte etwas reduziert werden. Unter dem Begriff Versetzungsdichte bzw. Defektdichte wird hier die Fadenversetzungsdichte verstanden. Da sich die meisten dieser Versetzungen weiter durch neu aufgewachsene Schichten hindurch fortsetzen, verschlechtern sie die elektrischen und optischen Eigenschaften dieser Schichten erheblich.

Da das Siliziumgermanium- (Si-Ge)-Materialsystem thermodynamisch ein völlig mischbares System ist, kann die Verbindung in beliebiger Konzentration hergestellt werden. Silizium und Germanium zeichnen sich zwar durch  
5 gleiche Kristallstrukturen aus, unterscheiden sich aber im Gitterparameter um 4,2 %, d. h. dass eine Si-Ge-Schicht oder eine reine Ge-Schicht auf Silizium verspannt aufwächst. Kohlenstoff kann in Silizium bis zu ca. 2 Atom-% substitutionell eingebaut werden, um den  
10 Gitterparameter zu verkleinern.

Stand der Technik zur Herstellung von verspanntem Silizium auf verspannungsfreien, qualitativ hochwertigen Siliziumgermanium-Legierungsschichten auf einem Silizium-Substrat ist der Einsatz sogenannter graded layer  
15 auf dem dann in einem weiteren Schritt die erwünschte verspannte Schicht abgeschieden wird. Bei den graded layer handelt es sich um Si-Ge-Schichten, deren Ge-Konzentration zur Oberfläche hin bis zur Erreichung des gewünschten Ge-Gehalts kontinuierlich oder stufenweise  
20 zunimmt. Da zur Einhaltung der Schichtqualität nur ein Anstieg des Ge-Gehalts von ca. 10 Atom-% pro  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden kann, sind solche Schichten, je nach erreichter Ge-Konzentration bis zu 10 Mikrometer dick. Das Schichtwachstum dieser graded layer wird in E. A.  
25 Fitzgerald et al. (Thin Solid Films, 294 (1997) 3-10) beschrieben.

Dieses Verfahren führt nachteilig zu hohen Schichttrauhigkeiten, zu Versetzungsmultiplikation und somit zur Bündelung von Threading-Versetzungen, die sogar zu  
30 funktionsunfähigen Bauelementen führen können. Dadurch

entstehen auch kristallographische Verkipungen von Bereichen, so dass ein aufwendiges Polieren der Schichten z.B. mittels chemical mechanical polishing erforderlich ist, bevor verspanntes Silizium auf dem so hergestellten Puffer in einem zusätzlichen Epitaxieschritt abgeschieden werden kann. Vor dieser zweiten Schichtabscheidung in einem CVD-Reaktor oder in einer Molekularstrahlepitaxieanlage muss noch eine spezielle Waferreinigung durchgeführt werden, um einkristallines Wachstum zu gewährleisten und den Einbau von Verunreinigungen oder unerwünschten Dotierungen zu minimieren. Die vielen Prozessschritte, unter anderem ein langer Abscheideprozess infolge der großen erforderlichen Schichtdicke, aufwendiges Polieren, Waferreinigungen und zwei getrennte Epitaxieschritte reduzieren den Durchsatz und begrenzen die Qualität. Die thermische Leitfähigkeit eines solchen graded layers ist im Vergleich zu Silizium so stark vermindert, dass es schnell zu einem Überhitzen der Hochleistungsbaulemente kommt.

Zwar ist aus Leitz et al. (Applied Physics Letters, Vol. 79(25) (2001), p. 4246-4248) sowie aus Cheng et al. (Mat. Res. Soc. Symp., Vol. 686 (2002) A1.5.1-A1.5.6) bekannt, dass eine spannungsrelaxierte bzw. eine verspannte Schicht mit Waferbonden auf einen zweiten Wafer übertragen werden kann. Nachteilig setzt diese Vorgehensweise aber sehr viele, technologisch äußerst schwierige Technologieschritte voraus. Eine spannungsrelaxierte Schicht oder auch nur eine verspannte Oberflächenschicht kann so auf eine isolierende SiO<sub>2</sub>-Schicht, die sich auf dem zweiten Wafer befindet gebondet werden. Unter anderem ist es äußerst problematisch

die verspannte Schicht durch Waferbonden auf ein zweites Substrat zu übertragen, ohne die elastische Ver-  
spannung der Schicht zu verändern und den Einbau von Verunreinigungen zu vermeiden. Verunreinigungen z. B.  
5 an der Grenzfläche des verspannten Siliziums zum SiO<sub>2</sub> erhöhen unerwünscht die Grenzflächenzustandsdichte. Selbst kleinste Verunreinigung können das Schaltverhalten von MOSFETs, die auf dem verspannten Silizium hergestellt werden, sehr ungünstig beeinflussen. Gerade  
10 bei MOSFET mit ultradünnem, verspanntem Silizium sollte die Grenzflächenzustandsdichte bzw. interface state density an der Si/SiO<sub>2</sub>-Grenzfläche möglichst im Bereich von 10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup> liegen. Dies ist technologisch nur mit ultrareinen Grenzflächen zu erreichen. Ob diese Wafer-  
15 bond-Verfahren dies überhaupt erfüllen, ist noch nicht gezeigt.

Aus R. Delhouge, P.Meunier-Beillard, M. Caymax, R. Loo, W. Vanderhorst (First Int. SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM2003), Jan. 15-17, 2003, Nagoya, Japan,  
20 p. 115) ist bekannt, dass dünne relaxierte Si-Ge Schichten dadurch erzeugt werden können, dass in eine Si-Ge-Schicht (z.B. 170 Nanometer Si-Ge mit 22 atom%Ge) eine sehr dünne (z. B. 10 Nanometer) Si-C Schicht mit einem ausreichend hohen Kohlenstoffgehalt eingebaut  
25 wird. Während des Temperns bei hohen Temperaturen von ca. 1000°C scheidet sich der in Übersättigung vorliegende Kohlenstoff aus. Dadurch werden Defekte gebildet, die die Relaxation einer Si-Ge-Schicht begünstigen.

Nachteilig ist, dass auch damit keine verspannte  
30 Schicht auf einem Isolator hergestellt werden kann. Die



Oberflächenrauigkeit macht in der Regel ein Polieren erforderlich. Desweiteren ist eine hohe Temperatur zur Relaxation erforderlich, da diese durch die Ausscheidung des Kohlenstoffs bestimmt wird und so nicht wesentlich gesenkt werden kann.

Aus WO 99/38201 ist ein Verfahren bekannt, das die Herstellung von dünnen spannungsrelaxierten Si-Ge-Pufferschichten mittels Ionenimplantation und Temperaturbehandlung erlaubt. Nachteilig an diesem Verfahren ist, dass damit keine verspannte Schicht direkt auf einem Substrat hergestellt werden kann. Zudem sind dabei zwei getrennte Epitaxieabscheidungen und Waferreinigungen erforderlich.

Aufgabe der Erfindung ist es somit ein einfaches Verfahren zur Herstellung einer verspannten Schicht hoher Qualität auf einem Substrat ohne Waferbonden und / oder Waferpolieren bereit zu stellen.

Insbesondere soll in einer vorteilhaften Ausgestaltung verspanntes Silizium direkt auf einem SOI-Wafer ganzflächig oder lokal, in beliebiger Form erzeugt werden. Bei lokaler Anwendung soll zudem die Planarität zwischen den verspannten und nicht verspannten Bereichen ohne Stufenbildung für die weitere Prozessierung von Bauteilen gewährleistet sein.

Ferner ist es Aufgabe der Erfindung elektronische und/oder optoelektronische Bauteile zur Verfügung zu stellen, die die oben genannte vorteilhafte Schichtstruktur aufweisen.

Die Aufgabe der Erfindung wird durch ein Verfahren gemäß Hauptanspruch gelöst.

Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Schichtstruktur gemäß Nebenanspruch gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den jeweils darauf rückbezogenen Patentansprüchen.

Gemäß Hauptanspruch werden zur Herstellung einer verspannten Schicht auf einem Substrat folgende Schritte ausgeführt:

- Erzeugung von Defekten in einem zu der zu verspannenden Schicht benachbarten Schicht,
- Relaxation mindestens einer zu der zu verspannenden Schicht benachbarten Schicht.

Hierzu wird die Schichtstruktur mindestens einer Temperaturbehandlung und / oder einer Oxidation unterzogen, so daß ausgehend von den Defekten Versetzungen gebildet werden, die zu einer Relaxation einer zu der verspannenden Schicht benachbarten Schicht führen.

Als Folge hieraus verspannt vorteilhaft die zu verspannende Schicht.

Unter dem Begriff Defekt sind Kristalldefekte, das heißt atomare und ausgedehnte Fehlstellen, z. B. Cluster, Bläschen, Hohlräume und so weiter zu verstehen. Ausgehend von derartigen, erzeugten Defektbereichen werden Versetzungen gebildet, die zu einer Relaxa-

tion einer zu der verspannenden Schicht benachbarten Schicht führen.

Unter Relaxation ist der Abbau der elastischen Verspannung innerhalb einer Schicht zu verstehen.

5 Unter benachbarter Schicht ist eine Schicht zu verstehen, die unmittelbar oder getrennt durch eine oder mehrere weitere Schichten von der zu verspannenden Schicht angeordnet ist, sofern gewährleistet ist, daß die Versetzungen zur Relaxation einer zu der zu verspannenden  
10 Schicht unmittelbar benachbarten Schicht führt.

Unter Substrat ist im weitesten Sinne eine Schicht zu verstehen auf der die zu verspannende Schicht angeordnet ist.

15 Im Zuge des Verfahrens ist es möglich weitere Schichten anzuordnen.

Auf der freien Oberfläche der zu verspannenden Schicht kann epitaktisch wenigstens eine erste Schicht aufgebracht werden, wobei diese erste Schicht einen anderen Verspannungsgrad aufweist als die zu verspannende  
20 Schicht. Es können sodann in der ersten Schicht Defekte erzeugt werden. Die Schichtstruktur wird mindestens einer Temperaturbehandlung unterzogen, so daß ausgehend von den Defekten, Versetzungen gebildet werden, die zur Relaxation der ersten Schicht führen. Als Folge hieraus  
25 verspannt die darunter angeordnete zu verspannende Schicht.

Die Defekte können auch in der zu verspannenden Schicht selbst erzeugt werden.

Als eine erste Schicht wird auch eine gradierte Schicht verstanden, wobei der an der zu verspannenden Schicht angeordnete Bereich der gradierten Schicht einen anderen Verspannungsgrad aufweist als die zu verspannende Schicht. Sodann wird in der gradierten Schicht ein Defektbereich erzeugt. Die Schichtstruktur wird einer Temperaturbehandlung unterzogen, so daß ausgehend vom Defektbereich, Versetzungen gebildet werden, die zur Relaxation des an der zu verspannenden Schicht angeordneten Bereiches der gradierten Schicht führen. Als Folge hieraus verspannt wiederum die angrenzende zu verspannende Schicht.

Im Zuge der erfindungsgemäßen Verfahren wird die zu verspannende Schicht in eine elastisch verspannte Schicht transformiert. Hierzu relaxiert eine an die zu verspannende Schicht angrenzende Schicht, wodurch vorteilhaft bewirkt wird, daß die zu verspannende Schicht in den gewünschten verspannten Zustand übergeht. Im Falle einer gradierten Schicht als erster Schicht relaxiert der Schichtbereich der gradierten Schicht, der an die zu verspannende Schicht angrenzt, so daß die zu verspannende Schicht wiederum in den gewünschten verspannten Zustand übergeht. Die auf der zu verspannenden Schicht angeordnete Schicht weist einen anderen Verspannungsgrad auf, als die zu verspannende Schicht selbst.

Im Zuge des Verfahrens ist es möglich weitere Schichten anzuordnen.

So ist es möglich, ein Verfahren mit den folgenden Schritten auszuführen:

- 5       - auf einer zu verspannenden Schicht auf einem Substrat werden epitaktisch wenigstens eine erste und auf dieser eine zweite Schicht unterschiedlicher Gitterstruktur aufgebracht, wobei die erste Schicht einen anderen Verspannungsgrad aufweist als die zu  
10       verspannende Schicht,
- in der zweiten Schicht und / oder in einer weiteren Schicht wird ein Defektbereich erzeugt,
- die Schichtstruktur wird einer Temperaturbehandlung unterzogen, so daß ausgehend vom Defektbereich Ver-  
15       setzungen gebildet werden, die zur Relaxation der ersten Schicht führen.

Die erste, relaxierende Schicht grenzt an die zu verspannende Schicht an, und als Folge hieraus verspannt wiederum die zu verspannende Schicht.

- 20       Mit unterschiedlicher Gitterstruktur sind Schichten gemeint, die Unterschiede in den Gitterparametern und / oder in der Kristallstruktur aufweisen.

- 25       Erfindungsgemäß kann zwischen einer zu verspannenden Schicht und dem Substrat eine weitere, im Zuge des Verfahrens ebenfalls relaxierende Schicht angeordnet wer-

den. Man erhält somit auf einem Substrat eine relaxierende Schicht auf der eine zu verspannende Schicht angeordnet wird. Auf dieser kann wiederum eine im Zuge des Verfahrens relaxierende Schicht angeordnet werden.

5 Auf dieser relaxierenden Schicht kann wiederum eine zu verspannende Schicht angeordnet werden. Weitere Schichten können angeordnet werden. Die relaxierenden Schichten weisen einen anderen Verspannungsgrad auf, als die hierzu benachbarten zu verspannenden Schichten. Nach

10 Relaxation der Schichten verspannen die zu verspannenden Schichten in einem Verfahrensschritt während der Temperaturbehandlung bzw. während der Oxidation.

Der Defektbereich kann auch im Substrat erzeugt werden.

Der Defektbereich wird so erzeugt, daß die Versetzungen

15 zu einer Relaxation einer zu der zu verspannenden Schicht benachbarten Schicht führen.

Eine derartige epitaktische Schichtstruktur, bzw. Wafer kann vorteilhaft in einem Abscheideprozess hergestellt werden. Besonders vorteilhaft kann der Wafer dabei im

20 Reaktor belassen werden und ohne aufwendiges Polieren und Reinigen abgeschieden werden.

Durch Wahl der Verspannung der auf der zu verspannenden Schicht angeordneten Schicht, Zug- oder Druckspannung, wird die resultierende Spannung für die zu verspannende

25 Schicht gewählt.

Um die Relaxation einer zu der zur verspannenden Schicht benachbarten Schicht und somit die Verspannung

der zu verspannenden Schicht herbei zu führen, wird die Schichtstruktur vorteilhaft mindestens einer Temperaturbehandlung unterzogen. Es ist aber denkbar, an Stelle einer Temperaturbehandlung eine andere Behandlung vorzusehen, so daß eine benachbarte relaxiert und die zu verspannende Schicht verspannt.

Es ist insbesondere vorstellbar die Relaxation mittels Oxidation mit O<sub>2</sub> oder Wasserdampf auszulösen. Anstelle einer rein thermischen Behandlung zur Bildung relaxierter Bereiche kann demnach eine Oxidation als Behandlung, oder auch eine Kombination von Oxidation und thermischer Behandlung eingesetzt werden. Hierdurch läßt sich auch die Konzentration von Elementen, die für die Funktionsweise des Bauelements wichtig sind, innerhalb der Schichtstruktur (z.B. Ge-Anreicherung in Si-Ge) erhöhen.

Mit Substrat ist insbesondere ein SOI-Substrat gemeint, deren Silizium-Oberfläche verspannt wird.

Als Substrat ist generell auch eine amorphe Schicht, insbesondere ein Isolator gemeint. Es kann aber genauso gut ein Material mit beliebigen elektrischen Eigenschaften verstanden werden, das eine thermisch induzierte Verspannung der zu verspannenden Schicht mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens zulässt. In diesem Sinne kann eine kristalline Heterogrenzfläche mit einer ausreichend großen Gitterfehlانpassung (z.B. 1%) oder mit unterschiedlicher Kristallstruktur geeignet sein, wenn die Schichtdicke der zu verspannenden Schicht d<sub>3</sub> klein genug gewählt wird (z. B. 5-50 Nanome-

ter) und das Substrat ausreichend dick ist, z. B. 10 - 100 mal so dick wie die zu verspannende Schicht. Diese Bedingungen werden z. B. von dem einkristallinen SOI-Substrat Silicon on Sapphire erfüllt.

5 Geeignet sind auch Substrat-Materialien, die bei den zur Relaxation erforderlichen Temperaturen viskos werden. Beispielsweise wird Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) bei Temperaturen um  $950^\circ$  viskoelastisch. Mittels Bor-Dotierung kann  $\text{SiO}_2$  bereits bei ca.  $800^\circ\text{C}$  viskoelastisch gemacht  
10 werden.

In diesem Sinne sind auch andere temperaturbeständige Gläser geeignet. Solche Substrate können durch Waferbonden, ähnlich wie kommerzielle BESOI Substrate, wo eine dünne Si-Schicht auf Siliziumdioxid gebondet wird,  
15 hergestellt werden. Die zu verspannende Schicht kann somit im Prinzip auf ein beliebiges Glas oder ein anderes geeignetes, temperaturbeständiges Substrat aufgebracht werden oder sein. Bei entsprechender Dicke dieser Materialien können diese auch die Funktion einer  
20 geeigneten mechanischen Unterlage für den Schichtaufbau aufweisen. Selbst eine gewisse Biegsamkeit des Substrates wäre im Hinblick auf die Entwicklung von „flexible electronics“ wünschenswert.

Als Materialien für das Substrat kommen insbesondere  
25 z. B. SiC, Graphit, Diamant, Quarzglas, GdGa-Granate, aber auch III-V Halbleiter und III-V-Nitride in Betracht.



Das erfindungsgemäße Verfahren weist eine Reihe von Vorteilen auf.

Vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass zur Erzeugung einer verspannten Schicht nur eine Epitaxieabscheidung und keine aufwendigen und zeitraubenden Prozessschritte wie Waferbonden und Polieren (CMP) erforderlich ist.

Weiterhin vorteilhaft ist, dass kommerziell erhältliche SOI-Strukturen, BESOI oder SIMOX-Wafer mit einer dünnen zu verspannenden Silizium-Oberfläche als Grundstruktur verwendet werden können. Die Siliziumschicht dieser Wafer wird während des Verfahrens verspannt. SIMOX-Wafer haben zwar in der Regel eine Versetzungsdichte von ca.  $10^5 \text{ cm}^{-2}$ , bestenfalls  $10^2$ - $10^3 \text{ cm}^{-2}$ , zeichnen sich aber durch eine sehr gute Schichthomogenität und Reinheit, sowie durch wirtschaftliche Herstellung aus.

Das Verfahren nutzt Prozessschritte, die in der Silizium-Technologie etabliert sind. Die Technologie kann somit auch auf sehr große Wafer, z. B. 300 Millimeter Wafer übertragen werden.

Der Defektbereich kann durch Ionenimplantation erzeugt werden.

Es ist in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung auch möglich den Defektbereich bereits bei der Aufbringung der Schichten auf die zu verspannende Schicht zu erzeugen, beispielsweise durch Absenkung der Temperatur, z. B. auf ca.  $200^\circ\text{C}$  in einer Molekeluarstrahlepi-

taxieanlage während des Aufbringens der Schichten bzw. der gradierten Schicht auf die zu verspannende Schicht.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann der Defektbereich durch Einbau einer Si-C Schicht erfolgen.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann für eine Temperaturbehandlung als geeigneter Maßnahme eine Temperatur zwischen 550 und 1200°C und insbesondere zwischen 700 und 950 °C gewählt werden. Dabei bilden sich ausgehend vom Defektbereich in der ersten und / oder zweiten Schicht Defekte, insbesondere Versetzungen, die zur Relaxation der ersten Schicht führen, wodurch die zu verspannende Schicht verspannt wird.

Durch Wahl der Verspannung der ersten Schicht, Zug- oder Druckspannung, kann die resultierende Spannung in der zu verspannenden Schicht gewählt werden. Ist die erste Schicht vor der Temperaturbehandlung druckverspannt, z. B. nach Wahl von Si-Ge als Material für die erste Schicht (mit beliebiger Ge-Konzentration) dann wird die zu verspannende Schicht, z. B. bestehend aus Silizium, zugverspannt.

Hingegen kann druckverspanntes Silizium beispielsweise durch Verwendung einer zugverspannten ersten Schicht aus beispielsweise Si-C mit bis zu ca. 1-2at % C erzeugt werden. Die Verwendung von ternären Legierungen, wie Si-Ge-C, und die Verwendung von dotierten Si-Schichten bzw. Legierungen (B, As, P, Sb, Er, S oder andere) ist ebenfalls möglich.

Die Temperaturbehandlung kann in inerter Atmosphäre, Vakuum oder auch in oxidierender, z. B. in  $O_2$  oder  $H_2O$  Umgebung oder in nitridierender, z. B. in  $NH_3$  oder reduzierender Atmosphäre, z. B. in Formiervgas erfolgen.

5 Sehr gute Ergebnisse werden bei Temperaturbehandlung in Stickstoff erzielt.

Die so erzeugte verspannte Schicht wird freigelegt, beispielsweise durch nasschemisches Entfernen zunächst der zweiten und sodann zumindest teilweise der ersten

10 Schicht. Diese Schichtstruktur dient dazu komplexere Schichtstrukturen aufzubauen. Hierzu wird ein Fachmann alle geläufigen Prozessierungen und Schicht-Materialien erwägen, je nachdem welche Schichtstruktur gebildet werden soll, bzw. je nachdem welche Anforderungen die

15 zu bildende Schichtstruktur erfüllen soll.

Als Ausgangsstrukturen können, wie erwähnt, grundsätzlich SOI-Strukturen, SIMOX-Wafer oder BESOI-Strukturen gewählt werden. In diesem Fall liegen die zu verspannende Schicht, der Isolator und das Substrat bereits

20 als Grundstruktur vor.

Es ist aber auch möglich, daß die zu verspannende Schicht erst auf einer amorphen Schicht, z. B. einem Isolator als amorpher Schicht aufgebracht wird und sodann verspannt wird. Der Isolator kann dabei auf einem

25 Substrat, z. B. aus Silizium angeordnet sein, oder wie erwähnt selbst das Substrat darstellen.

Die zu verspannende Schicht kann vorteilhaft aus Silizium gewählt werden. Die zu verspannende Schicht kann

besonders vorteilhaft mit einer Dicke  $d_3$  von 1-100 Nanometern, insbesondere von 5-30 Nanometer gewählt werden. Diese Schichtdicke  $d_3$  soll zumindest die kritische Schichtdicke nicht überschreiten und sie muss so klein sein, dass zumindest ein wesentlicher Teil der Versetzungen aus der ersten Schicht sich entlang der Gleitebenen in dieser Schicht ausbreiten können. Diese Dicke hängt insbesondere von dem Verspannungsgrad der ersten Schicht und deren Schichtdicke  $d_4$  ab. Je größer die erwünschte Verspannung der Schicht, desto kleiner muss  $d_3$  sein. Ein großes Schichtdickenverhältnis von  $d_4/d_3$  erscheint vorteilhaft insbesondere ein Schichtdickenverhältnis von  $d_4/d_3$  von größer gleich 10.

In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung kann als die erste Schicht auf der zu verspannenden Schicht z. B. eine epitaktische Si-Ge- oder Si-Ge-C oder Si-C Schicht mit einer Dicke, die vorteilhaft nahe der kritischen Schichtdicke liegt, abgeschieden werden. Die kritische Schichtdicke definiert die maximale Schichtdicke für diese erste Schicht, bei der noch ein defektfreies Wachstum auf der nicht gitterangepassten zu verspannenden Schicht möglich ist. Bei einer Schichtdicke unterhalb dieser kritischen Schichtdicke kann daher in der Regel streng pseudomorphes, d. h. völlig defektfreies Wachstum erzielt werden. Die kritische Schichtdicke sollte nicht so weit überschritten werden, dass die Schicht bereits merklich relaxiert.

Alternativ zu einer Schicht mit konstanter Zusammensetzung kann auch eine gradierte Schicht angeordnet werden. Das heißt die Zusammensetzung steigt oder fällt

innerhalb der gradierten Schicht. Im Falle von Si-Ge kann die Ge-Konzentration langsam oder in Schritten erhöht werden, oder es kann auch mit einer höheren Ge-Konzentration oder gar mit reinem Germanium (Ge) über nur wenige Nanometer das Wachstum begonnen werden. Um trotzdem eine ausreichende Schichtdicke  $d_4$  zu erhalten ohne die kritische Schichtdicke zu überschreiten, kann die Ge-Konzentration dann schnell abfallen (z. B. auf 25at%). Unter den gewählten Bedingungen kann die Schichtdicke noch um 80 Nanometer liegen. Der Bereich mit der hohen Ge-Konzentration ermöglicht hohe Relaxationsgrade über 80%.

Auch ein U-Konzentrationsprofil kann von Vorteil sein, um bei einer bestimmten Ge-Konzentration von z. B. 20-40at% einen möglichst großen Relaxationsgrad der ersten Schicht und somit einen hohen Grad der Verspannung für die zu verspannende Schicht zu erzielen.

Es ist zudem vorteilhaft, die Dicke  $d_4$  der ersten Schicht möglichst groß zu wählen, da dann die Spannungsrelaxation effizienter abläuft.

Bei einer konstanten Ge-Konzentration von 20 at% Ge kann eine maximale Schichtdicke von ca. 400 Nanometer erzielt werden. Ein komplexes Konzentrationsprofil ist bei höheren Ge-Gehalten von Vorteil.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann die zweite epitaktisch abzuschheidende Schicht aus epitaktischem Silizium gewählt werden. Diese Schicht dient dann zur Bildung eines Defektbereiches. Die Schichtdicke  $d_5$

dieser Schicht kann für die Bildung des Defektbereiches optimiert werden. Sie ist nicht durch Wachstumskriterien begrenzt.  $d_3$  kann somit frei variiert werden (z. B. 0-1000 Nanometer). Vorteilhaft erscheint eine Dicke von ca. 200-500 Nanometer bei Wasserstoff- und Helium-Implantationen. Eine möglichst dünne Schicht ermöglicht Implantation mit kleinen Energien (z. B. 10 keV) und somit mit schärferer Verteilung der implantierten Ionen, was vorteilhaft für die Bildung eines dünnen Defektbereiches ist, und zudem spart sie Kosten.

Optional kann auch eine weitere Schicht, z. B. zur Vermeidung von Oberflächenaufrauung durch Blistern nach einer Wasserstoff- oder Heliumimplantation auf der zweiten Schicht abgeschieden werden. Diese Schicht kann amorph oder polykristallin sein. Diese Schicht kann vor oder nach der Erzeugung des Defektbereichs z. B. durch Ionenimplantation abgeschieden werden. Die Schichtdicke dieser optionalen Schicht muss lediglich mit den Implantationsparametern abgestimmt werden.

Die hier angegebenen Materialien und Dicken der einzelnen Schichten sind beispielhaft und führen selbstverständlich nicht zur Einschränkung der Erfindung.

In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird durch Anordnung einer Maske auf der zweiten oder weiterer optionaler Schichten ein lokal begrenzter Defektbereich erzeugt. Dadurch wird besonders vorteilhaft bewirkt, daß aus der zu verspannenden Schicht lokal verspannte und unverspannte Bereiche planar, das heißt in einer Ebene direkt nebeneinander ohne

weitere Stufenbildung wie bisher aus dem Stand der Technik bekannt, erzeugt werden.

Der oder die Defektbereiche können besonders vorteilhaft durch Ionenimplantation vorzugsweise mit leichten Ionen wie Wasserstoff ( $H^+$ ,  $H_2^+$ ), Helium, Fluor, Bor, Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und so weiter oder durch Ionen des Schicht- bzw. Substratmaterials selbst, also z. B. Silizium oder Germanium bei einer Si/Si-Ge-Heterostruktur in der Art erfolgen, dass die Ionen primär in der zweiten Schicht implantiert werden.

Es ist vorteilhaft Ionen zu verwenden, die ungewollte Kontamination bzw. Dotierung der Struktur vermeiden. In diesem Sinne sind auch Edelgasionen z. B. Ne, Ar, Kr und so weiter einsetzbar.

Für Wasserstoff oder Helium-Ionen wird eine Dosis von etwa  $3 \times 10^{15}$  bis  $3,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , insbesondere aber für Helium von  $0,4 - 2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  verwendet. Auch eine Kombination von zwei Implantationen, z. B. erst Wasserstoff und dann Helium oder erst Bor und dann Wasserstoff sind geeignet. Eine Bor-Implantation in Verbindung mit einer Wasserstoff-Implantation erlaubt die Dosis der Wasserstoff-Implantation zu reduzieren. Auch eine Temperaturbehandlung zwischen den Implantationen kann vorteilhaft sein, um Nukleationskeime für die Defektbildung zu erzeugen.

Der Defektbereich wird vorteilhaft in einem Abstand von 50 bis 500 Nanometer von der zu relaxierenden Schicht erzeugt.

Im Fall von Wasserstoff oder Helium Ionen wird die Energie der Ionen und somit die mittlere Reichweite der Ionen so gewählt, dass sie in einem Abstand  $d_6$  von der Grenzfläche der ersten zur zweiten Schicht implantiert werden. Dieser Abstand  $d_6$  liegt z. B. im Bereich von etwa 50 bis 300 Nanometern. Für schwerere Ionen und / oder größere Schichtdicken der zweiten Schicht können diese Grenzen auch überschritten werden.

Wird nur eine Schicht mit gleichbleibender Konzentration (oder eine gradierte Schicht) auf der zu verspannenen Schicht aufgebracht, so ist es einem Fachmann möglich durch wenige und einfache Versuche den Defektbereich derartig anzuordnen, daß nach Temperaturbehandlung die erste Schicht relaxiert und die zu verspannende Schicht verspannt.

Die Implantationstiefe wird an die Schichtdicke der zweiten Schicht und evtl. auch weiterer optionaler Schichten und der Masse des gewählten Ions angepasst.

In einer besonders vorteilhaften weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird die maximale Schädigung innerhalb der zweiten Schicht, insbesondere im Abstand  $d_6$  von der ersten Schicht und nicht in der ersten Schicht selbst erzeugt. Dies gilt insbesondere für Ionen, die zu einer Bläschen- oder Rissbildung führen wie z. B. Wasserstoff, Helium, Fluor, Neon, Argon, usw.

Vorteilhaft kann bei einer Si-Implantation im Vergleich zur Implantation mit sehr leichten Ionen wie z. B. Wasserstoff- oder Heliumionen die Dosis erheblich, das



heißt insbesondere um einen Faktor von 10-100 reduziert werden. Dies verkürzt vorteilhaft die Implantationszeiten und erhöht dadurch den Waferdurchsatz erheblich.

5 Mit dem Ziel einen höheren Relaxationsgrad zu erreichen kann aber auch mittels zwei oder mehrerer Implantationen die Defektbildung in der ersten Schicht und in der zweiten Schicht unabhängig voneinander eingestellt werden. Eine vorteilhafte Vorgehensweise ist auch erst eine oder mehrere Implantationen mit verschiedener Energie, eventuell auch mit verschiedenen Ionen in die erste  
10 te Schicht mit geringer Dosis auszuführen und mit einer zweiten Implantation den Defektbereich in der zweiten Schicht aufzubauen. Die Erzeugung von Punktdefekten in der zu relaxierenden ersten Schicht führt zu beschleunigter Diffusion und zu größerer Relaxation.  
15

Die Ionenimplantation kann ganzflächig oder durch die Verwendung einer Implantationsmaske z. B. Photolack an beliebigen Stellen auf dem Wafer durchgeführt werden.

20 In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird der Wafer für die Ionenimplantation nicht in einem Winkel von  $7^\circ$ , wie aus dem Stand der Technik bekannt, gekippt. Vielmehr wird der Wafer in einem Winkel von größer  $7^\circ$  aus der Normalen, insbesondere in einem Winkel von  $30-60^\circ$  gekippt.

25 Dadurch wird es möglich, verspannte und nicht verspannte Schichten nebeneinander auf dem Wafer unter Gewährleistung der Planarität herzustellen. Das wird letztlich dadurch möglich, da die abschließende Temperaturbehand-

lung mit einem so kleinen thermischen Budget durchgeführt werden kann, dass nicht implantierte Bereiche der ersten Schicht nicht oder kaum relaxieren und so die zu verspannende Schicht an diesen Stellen auch nicht verändert wird.

Es ist besonders vorteilhaft, die Implantationsmaske an das Layout der Bauelemente, bzw. Isolationsbereiche anzupassen. Nur die Bereiche, wo z. B. verspanntes Silizium für die Bauelemente benötigt wird, werden implantiert.

Vorteilhaft wird die erste Schicht durch die so durchgeführte Implantation kaum oder gar nicht geschädigt. Die optimale Dosis und Energie und Ionensorte hängt nicht von der Zusammensetzung und Schichtdicke der ersten zu relaxierenden Schicht ab und kann so einfacher optimiert werden, wenn in der zweiten Schicht implantiert wird.

Nach Entfernen der ersten und gegebenenfalls der zweiten Schicht und weiterer optionaler Schichten erhält man die erwünschte verspannte Schicht, bzw. an den nicht implantierten Stellen unverspannte Bereiche dieser Schicht mit der gleichen Schichtdicke unter Beibehaltung der Planarität. Vorteilhaft wird die erste hierauf aufgebrachte Schicht zumindest in der letzten Abtragsphase selektiv nasschemisch entfernt.

Die Übergangsbereiche in zwischen verspannten und unverspanntem Bereichen werden vorteilhaft als Isolationsbereiche zwischen den Bauelementen ausgeführt.

Besonders vorteilhaft wird dabei wiederum Siliziumdioxid als Isolationsmaterial gewählt.

In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird an Stelle einer ausschließlich ersten Schicht ein Schichtsystem aus mehreren Schichten verwendet.

Auf erzeugte verspannte Bereiche können weitere epitaktische Schichten abgeschieden werden, um z. B. die Schichtdicke der verspannten Bereiche zu erhöhen oder lokal auf dem Wafer anzupassen bzw. auch neue Schichten z. B. für komplexere elektronische oder optoelektronische Bauelemente realisieren zu können.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann eine verspannte Schicht erzeugt werden, die vorteilhaft eine extrem geringe Oberflächenrauigkeit von regelmäßig weniger als 1 Nanometer und nur eine geringe Defektdichte von weniger als  $10^7 \text{ cm}^{-2}$ , insbesondere von weniger als  $10^5 \text{ cm}^{-2}$  aufweist.

Die geringe Rauigkeit ist besonders vorteilhaft bei Herstellung von MOSFETs, wo ein thermisches Oxid oder ein anderes Dielektrikum, z. B. ein high-k Dielektrikum, das heißt ein Material mit hoher Dielektrizitätskonstante auf der verspannten Schicht erzeugt werden muss. Die Oberflächenrauigkeit beeinflusst äußerst empfindlich die elektrische Qualität des Dielektrikums, das das Herzstück eines Transistors darstellt. Auch die Beweglichkeit der Ladungsträger wird in einer sehr dünnen Schicht stark von den Grenzflächen bestimmt. Die Oberflächenrauigkeit von beispielsweise verspannten

Silizium kann durch Wachstum eines thermischen Oxides weiter reduziert werden. Dieses so hergestellte Oxid kann dann vor des Wachstums oder der Abscheidung des Gatedielektrikums entfernt werden.

5 Das Verfahren bietet in einer weiteren, besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung das Potential zur weiteren Reduktion der Versetzungsdichte in der relaxierten und der verspannten Schicht.

10 Dies kann durch Ätzen von Gräben in den Schichten mit Mikrometer-Abständen beispielsweise von 1 bis 100 Mikrometer oder vorteilhafter, durch Ätzgräben, die an die Bauelementstrukturen angepasst sind, und nachfolgendes Tempern bei Temperaturen über 500°C erzielt werden. Fadenversetzungen in der Schicht gleiten dabei an den  
15 Rand dieser Bereiche und werden so ausgeheilt. Diese Ätzgräben können darüber hinaus auch zur Herstellung sogenannter shallow trench isolations verwendet werden. Hierzu werden die Gräben mit einem Isolatormaterial aufgefüllt und so die Bauelemente voneinander elekt-  
20 risch getrennt.

Ein weiteres geeignetes Verfahren zur Reduktion der Versetzungsdichte ist das Aufbringen auf einer entgegengesetzt verspannten Schicht auf die relaxierte erste  
25 Schicht, nachdem diese durch Implantation und Temperaturbehandlung teilweise relaxiert worden ist. Zur weiteren Relaxation von z. B. einer Si-Ge Schicht eignet sich eine druckverspannte Schicht z. B. eine Siliziumnitridschicht (z. B. 100 Nanometer), die in einem PECVD-Reaktor deponiert worden ist. Eine anschließende

Temperaturbehandlung, z. B. durch Tempern in inerte-  
oder reaktiver Atmosphäre, führt zu einer höheren Rela-  
xation der Si-Ge Schicht und somit zu einer höheren  
Verspannung der zu verspannenden Si-Schicht. Gleichzei-  
5 tig wird die Versetzungsdichte reduziert. Dieses Ver-  
fahren kann auch an vorher strukturierten Flächen ange-  
wandt werden.

Die Herstellung eines system on a chip, das heißt ver-  
schiedener Bauelemente mit verschiedenen Funktionen in  
10 einer Ebene, ist somit vorteilhaft im Rahmen der Erfin-  
dung möglich. Wie bereits ausgeführt können hiermit  
verspannte und nicht verspannte Schichten unter Gewäh-  
rung der Planarität hergestellt werden. Dies ermöglicht  
die Herstellung von speziellen Bauelementen/Schaltungen  
15 mit verspannten oder nicht verspannten Bereichen aus  
z. B. Silizium. Diese insbesondere sehr dünnen Schich-  
ten können lokal durch weitere Abscheidung, z. B. auch  
durch selektive Abscheidung verstärkt werden, um z. B.  
Kontakte für Source und Drain, sogenannte „raised Sour-  
20 ce and Drain“ und Leistungsbauelemente zu fertigen.

Auch die zweite Schicht, z. B. eine verspannte Si-Ge-  
Schicht kann in den nicht implantierten Bereichen für  
die Herstellung von speziellen Bauelementen z. B. be-  
sonders vorteilhaft für p-MOSFET verwendet werden, da  
25 diese Schichten je nach Ge-Gehalt besonders hohe Lö-  
cherbeweglichkeiten aufweisen, z. B. um den Faktor 2-3  
erhöht gegenüber Silizium.

Für die Herstellung z. B. von p- und n- Kanal MOSFETs  
können die so erzeugten verspannten Si-Schichten vor-

teilhaft genutzt werden, da die Elektronen- und die Löcherbeweglichkeiten in dem tetragonalen Gitter des verspannten Siliziums um ca. 100% bzw. ca. 30% im Vergleich zu unverspanntem Silizium erhöht ist, wenn die Gitterverspannung  $> 1\%$  ist. Dabei ist man nicht an bestimmte Transistortypen oder Bauteile gebunden. Auch MODFETs, resonante Tunneldioden, Photodetektoren und Quantenkaskadenlaser können realisiert werden.

Im Folgenden wird die Erfindung an Hand von Ausführungsbeispielen und den beigefügten Figuren näher erläutert.

Es zeigen:

Figur 1: Schematisches Schichtsystem, umfassend ein SOI-Substrat 1, 2, 3 und eine erste sowie eine zweite hierauf epitaktisch aufgebraute Schicht 4, 5.

Figur 2: Schematisches Schichtsystem, umfassend ein SOI-Substrat 1, 2, 3 und eine epitaktisch aufgebraute Schichtstruktur mit Implantationsmaske 6 und Defektbereich 7 in der zweiten Schicht 5.

Figur 3: Schematisches Schichtsystem, umfassend ein SOI-Substrat 1, 2, 3 und eine epitaktisch aufgebraute Schichtstruktur umfassend eine weitere optionale Schutzschicht 8.

Figur 4: Schematisches Schichtsystem, umfassend ein SOI-Substrat 1, 2, 3 mit einem verspannten Bereich 9 neben einem nicht verspannten Bereich 3 auf einer Isolatorschicht 2.

Figur 5: Schematisches Schichtsystem mit zusätzlicher epitaktischer Schicht 10, die auf den verspannten und nicht verspannten Bereichen 9 und 3 epitaktisch aufgebracht wurde.

5      Figur 6: Alternativer schematischer Schichtaufbau mit drei auf der zu verspannenden Schicht 3 aufgetragenen Schichten 11, 12, 13. Schicht 11 dient als zusätzlich vergrabene, zu verspannende Schicht oder als Ätzstopp-Schicht.

10     Figur 7: Schematisches Schichtsystem mit Isolationsbereichen 14 (shallow trench isolations) zwischen verspannten Bereichen 9 und unverspannten Bereichen 3.

Figur 8: Schematisches Schichtsystem wie in Figur 1 mit Ätzgräben 15.

15     Figur 9: Schematische Darstellung eines MOSFETs auf einer verspannten Si-Schicht mit Gatestack und raised Source und Drain und Silizidkontakten auf einem Isolator. Rechts vom Transistor ist eine unverspannte Si-Schicht 3 zu sehen und links eine verspannte Si-Ge  
20     Schicht 11 auf einer unverspannten Si-Schicht 3.

Erstes Ausführungsbeispiel: Herstellung einer verspannten Si Schicht auf  $\text{SiO}_2$  mit Heliumionen- oder Wasserstoffionen-Implantation und Temperung

25     Wie in Figur 1 dargestellt wird mit Gasphasenepitaxie oder mit Molekularstrahlepitaxie auf einem SOI-Substrat 1, 2, 3 (SIMOX oder BESOI) auf einer 20 Nanometer dicken ( $d_3$ ) zu verspannenden Si-Oberflächenschicht 3 eine

erste epitaktische Si-Ge-Schicht 4 mit 22 at% Ge und einer Schichtdicke  $d_4$  von 220 Nanometer defektfrei oder nahezu defektfrei abgeschieden. Anschließend wird als  
5 zweite Schicht 5 einkristallines Silizium mit einer Dicke  $d_5$  von 500 Nanometern aufgebracht.

Die Schichtstruktur 1, 2, 3, 4, 5 wird nach Aufbringen einer Maske 6 (Figur 2) mit Helium-Ionen mit einer Energie von 20 keV und einer Dosis von  $1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  implantiert und anschließend bei 850°C 10 min getempert.  
10 Alternativ kann die Struktur auch mit Wasserstoff-Ionen mit einer Dosis von  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  implantiert werden. Durch die Implantation wird in Schicht 5 ein Defektbereich 7 nahe an der Grenzfläche ( $d_6$  beträgt ca. 200 nm) zur Si-Ge-Schicht 4 erzeugt, der während des Temperns  
15 zur Relaxation der Si-Ge-Schicht 4 in diesem Bereich führt während sich der Spannungszustand der nicht implantierten Bereiche nicht oder nicht wesentlich verändert. Der Relaxationsgrad der Si-Ge-Schicht beträgt nach der Temperung ca. 75%.

20 Optional kann Schicht 8 aus Siliziumdioxid mit einer Dicke von z. B. 500 Nanometern vor oder nach der Implantation aufgebracht werden. Hierdurch wird vorteilhaft bewirkt, dass Blistern der Oberfläche durch die Wasserstoff- oder Helium-Blasenbildung während der Temperaturbehandlung vermieden wird (Figur 3).  
25

Um den Relaxationsgrad zu erhöhen, kann ausgehend von der Schichtstruktur der Figur 3 die Schicht 5 bzw. Schicht 8 entfernt werden und eine unter Druckspannung stehende Siliziumnitrid ( $\text{SiN}_x$ ) Schicht mit einer Dicke



von ca. 100 Nanometern auf die partiell relaxierte Si-Ge-Schicht 4 deponiert werden (nicht dargestellt). Diese SiN<sub>x</sub>-Schicht kann mittels PE-CVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) abgeschieden werden. Eine  
5 zweite Temperung der Schichtstruktur bei 900 °C für 10 min erhöht an den implantierten Stellen den Relaxationsgrad auf über 80% und die Si-Schicht 9 wird weiter verspannt.

Das weitere Abätzen der Schicht 4 legt die Si-Schicht 3  
10 frei (Figur 4) und kann für die Herstellung von Hochgeschwindigkeitsbauelemente verwendet werden. Unter den implantierten Bereichen ist die Schicht 9 verspannt. Die Fadenversetzungsdichte ist kleiner als  $10^7 \text{ cm}^{-2}$ .

Um die Schichtdicke an die Bauelementanforderungen an-  
15 zupassen kann eine Schicht 10 (Figur 5), z. B. Si mit einer Dicke, die die kritische Schichtdicke nicht oder nicht wesentlich überschreitet epitaktisch deponiert werden. Es ist darauf zu achten, dass der Verspannungszustand sich entlang der Schicht 10 ändert, wie durch  
20 die unterschiedliche Schraffur der Schicht 10 angedeutet. Dieser ist abhängig von der Unterlage. Auf verspanntem Silizium 9 wird Silizium 10 bis zur kritischen Schichtdicke verspannt aufwachsen. Anstelle einer Si-Schicht kann auch jede andere Schicht oder Schichten-  
25 folge aufgebracht werden.

Zweites Ausführungsbeispiel: Herstellung einer verspannten Si-Schicht auf SiO<sub>2</sub> mit hoher Verspannung

Die Schichtherstellung folgt weitgehend dem erstem Ausführungsbeispiel ausgehend von der Figur 1.

Anstelle einer konstanten Zusammensetzung des Ge-Gehaltes der ersten Schicht 4 auf der zu verspannenden Schicht 3 eines SOI-Substrates 1, 2, 3 (oder des C-Gehaltes in einer Si-C-Schicht) wird eine gradierte Schicht 4 mit einem stark inhomogenen Konzentrationsverlauf aufgebracht. Nur optional wird die zweite Schicht 5 aufgebracht.

Es ist vorteilhaft, das Wachstum von Schicht 4 mit höherer Ge-Konzentration (z. B. 40at% Ge), eventuell sogar mit wenigen Nanometer dickem reinem Germanium zu beginnen und dann die Konzentration bis z. B. 20 at% abzusenken, um so eine Schichtdicke von 150 Nanometern ohne Bildung von Versetzungen in störender Dichte während des Wachstums zu erreichen. Optional kann die Ge-Konzentration über einen wesentlich größeren Schichtdickenbereich (z. B. 600 Nanometer) graduell oder in Stufen auf im Prinzip auf null abgesenkt werden, so dass gar keine zweite Schicht 5 deponiert werden muss.

Für einen symmetrischen Spannungsaufbau in der Schicht 4 kann auch ein U-förmiger Konzentrationsverlauf, das heißt erst abfallender dann ansteigender Ge-Gehalt in Wachstumsrichtung verwendet werden. Eine Schicht mit inhomogener Konzentration führt zu höheren Relaxationsraten und kleineren Defektdichten als äquivalente homogene Schichten. Die Schichtdicke  $d_4$  soll möglichst groß, aber in allen Fällen unterhalb der kritischen Schichtdicke liegen, so daß während des Wachstums keine merkliche Relaxation auftritt.

Drittes Ausführungsbeispiel: Si-Implantation anstelle von Implantation mit leichten Ionen

Alternativ zur Implantation mit leichten Ionen kann eine Si-Implantation beispielsweise mit einer Energie von ca. 150 keV und einer Dosis von etwa  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  in eine 500 Nanometer dicke Si-Schicht 5 erfolgen (Figur 2). Die implantierten Si-Ionen erzeugen Kristalldefekte in der zweiten Schicht 5 und in der Si-Ge-Schicht 4, die die Relaxation der Si-Ge-Schicht 4 und somit die Verspannung einer Si-Schicht 3 eines SOI-Substrates 1, 2, 3 begünstigen.

Anschließend erfolgt für einige Minuten als thermische Behandlung eine Temperung bei 900 °C in einer inerten Stickstoff-Atmosphäre oder im Vakuum. Die Implantationsenergie und -dosis wird durch Messung des Relaxationsgrades und der Defektdichte optimiert.

Optional können auch zwei oder mehrere Implantationen auch mit anderen Ionen durchgeführt werden, um den Defektbereich in der Schicht 5 und Punktdefekte in der zu relaxierenden Schicht 4 zu erzeugen. Es kann auch ein anderes inertes Gas (z.B. Argon) oder ein Gas, das für die Zwecke der Erfindung während der Temperaturbehandlung geeignet ist, verwendet werden (z. B. O<sub>2</sub> oder Formiergas).

Viertes Ausführungsbeispiel: Herstellung von zwei oder mehreren verspannten Schichten in einer Schichtstruktur auf SOI-Substrat 1, 2, 3 (Figur 6).

Auf einem SOI-Substrat 1, 2, 3 mit einer 10 Nanometer dicken Si-Oberflächenschicht 3 wird epitaktisch folgen-

des Schichtsystem deponiert: eine 25 Nanometer Si-Ge-Schicht 11 mit 22 atom% Ge, eine 10 Nanometer dicke Si-Schicht 12, eine 150 Nanometer dicke Si-Ge-Schicht 13 mit 22 atom% Ge (Germanium), eine 400 Nanometer dicke Si-Schicht 5 (Figur 6).

Optional können auch mehrere dünne Silizium-Schichten in der Si-Ge angeordnet sein.

Anschließend wird optional eine Implantationsmaske z. B. Photolack 6 aufgebracht und lithographisch strukturiert, so dass die folgende Ionenimplantation nur in die nicht abgedeckten Bereiche erfolgt. Sodann wird die Schicht mit Wasserstoff ( $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) oder Helium-Ionen ( $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ) implantiert, um einen Defektbereich etwa in der Mitte der 400 Nanometer dicken Si-Schicht 5 zu erzeugen (nicht dargestellt). Die Temperaturbehandlung erfolgt bei 825°C in Stickstoff.

In den nicht durch Maske 6 maskierten Bereichen erhält man nach Implantation und Temperaturbehandlung die folgende Schichtstruktur. Unterhalb der Silizium-Schicht 5 ist ein relaxierter Bereich der Schicht 13 auf einem verspannten Bereich der Schicht 12 angeordnet. Dieser Bereich der Schicht 12 ist wiederum auf einem relaxierten Bereich der Schicht 11 und dieser wiederum auf einem verspannten Bereich der Schicht 3 angeordnet (Fig. 6). Schicht 3 stellt die Oberfläche des SOI-Substrats dar.

Nach Entfernen der Silizium-Schicht 5 und der Si-Ge-Schicht 13 erhält man an den implantierten Bereichen

eine verspannte Si-Schicht 12 (10 Nanometer dick) auf einer hier 25 Nanometer dicken relaxierten Si-Ge-Schicht 11 (nicht mehr dargestellt im rechten Bildteil, da nach Ätzung entfernt) und eine zweite verspannte Si-Schicht 9 auf der SiO<sub>2</sub>-Schicht 2 des SOI-Substrates 1, 2, 3 (siehe Figuren 6 und 7).

In den nicht implantierten Bereichen unterhalb der Maske hat sich der Spannungszustand der Schichten 3, 11 und 12 nicht oder nicht wesentlich verändert. Schicht 3 und Schicht 12 stellen nach wie vor kubisches Silizium dar und die Si-Ge-Schicht 11 ist tetragonal verspannt (Figur 7). Diese Schichtstruktur kann für die Herstellung von Bauelementen bereits genutzt werden oder es werden weitere Schichten deponiert. Jeweils planar in einer Ebene eine der genannten Schichten ist ohne Stufenbildung ein entgegengesetzt verspannter Bereich des selben Schichtmaterials angeordnet.

Alternativ kann die 10 Nanometer dicke Si-Schicht 12 auch als Ätzstoppschicht dienen, um so die Oberflächenrauigkeit nach dem Abätzen auf < 1 Nanometer zu verringern. Dies ist insbesondere für die verspannte Si-Schicht 9 auf dem SiO<sub>2</sub> 2 wichtig, da auf diese Schicht für MOSFETs das Gatedielektrikum aufgebracht wird bzw. thermisch generiert wird. Reinheit und Grenzflächeneigenschaften bestimmen entscheidend die Qualität des Dielektrikums.

Isolationsbereiche 14 (shallow trench) im verspannten Bereich 9 können durch Ätzen und Auffüllen mit Isolationsmaterial hergestellt werden.

Fünftes Ausführungsbeispiel: Reduktion der Defektdichte durch Ätzgräben 15 und Temperaturbehandlung und Herstellung von Isolationsbereichen 14.

5 Analog zu den vorherigen Ausführungsbeispielen werden eine oder zwei oder mehrere verspannte Schichten hergestellt. In diese Schichtstruktur werden dann Ätzgräben 15 (Figur 8, bzw. Figur 7 vor der Herstellung der shallow trench 14) hergestellt. Diese Gräben 15 werden in der Regel bis zur Isolatorschicht 2 geätzt, um einfach  
10 Isolationsbereiche (shallow trench isolation) zwischen den Bauelementen durch Auffüllen mit einem Isolator 14 erzeugen zu können (wie in Figur 7). Nach dem Ätzen wird eine Temperung bei über 450°C, vorteilhaft über 650°C durchgeführt. Diese Temperung bewirkt, dass Fadenversetzungen in Schicht 4, einer Si-Ge Schicht und in der verspannten Schicht 9 zu den Gräben 15 laufen und so ausheilen. Es kann von Vorteil sein, die zweite Schicht 5, vor dem Ätzen der Gräben 15 zu entfernen, um  
15 die Versetzungsausheilung nicht durch Schicht 5 zu behindern. Desweiteren kann die Temperaturbehandlung auch später während der Bauelementeherstellung erfolgen und so z.B. gleichzeitig zur Ausheilung von Defekten nach Ionenimplantation oder beim Wachstum des Gate Dielektrikums genutzt werden.  
20

25 Sechstes Ausführungsbeispiel: Verspanntes Si auf SiO<sub>2</sub> nahezu in einer Ebene mit verspanntem Si-Ge Schicht und n- und p-MOSFET-Bauelemente.

Es wird eine Schichtstruktur entsprechend der Figur 6 benutzt, um erst die verspannten Schichten zu erzeugen.

Nach dem Entfernen von Schicht 5 und der Si-Ge-Schicht 13 können die Schichten 12 und 11 selektiv, z. B. an den implantierten Bereichen nasschemisch entfernt werden. Dadurch entsteht eine verspannte Silizium-Oberflächenschicht 9 (Figur 7) neben einer unverspannten Si-Schicht 3 auf der links im Bild eine dünne, verspannte Si-Ge Schicht 11 (nicht implantierte Bereiche der Schicht 11) nahezu in einer Ebene liegt. Die Stufenhöhe zwischen diesen Bereichen ist nur durch die Dicke der Schichten 11 und Schicht 12 (insgesamt 35 Nanometer) bestimmt. Diese Stufenhöhe ist kleiner als die Tiefenschärfe der Lithographie, so dass weitere Lithographieschritte problemlos durchgeführt werden können. Die Bereiche können durch Isolationsbereiche 14 elektrisch und strukturell getrennt werden (Figur 7).

Dadurch entsteht eine für MOSFET-Bauelemente optimale Struktur. An den Bereichen mit verspannten Silizium 9 können ultraschnelle n- und p-Kanal MOSFETs hergestellt werden, da die Elektronen- und die Löcherbeweglichkeiten in dem tetragonalen Gitter des verspannten Siliziums um ca. 100% bzw. ca. 30% im Vergleich zu unverspanntem Silizium erhöht ist, wenn die Gitterverspannung  $> 1\%$  ist. Auf der verspannten Si-Ge-Schicht 11 der Figur 7 bzw. auf der Silizium-Schicht 12 können vorteilhaft p-Kanal MOSFETs hergestellt werden, da sich die Si-Ge-Schicht 11 durch stark erhöhte Löcherbeweglichkeit auszeichnet. Die kleine Gesamtdicke der Schichten 3, 11 und 12 von ca. 45 Nanometern (Figur 7) erlaubt die Herstellung von fully depleted MOSFETs.

Die dünne Si-Schicht 12 kann vorteilhaft für die Herstellung des Gatedielektrikums genutzt werden, da darauf ein hochqualitatives thermisches Oxid oder Oxy-  
nitrid als Gatedielektrikum gebildet werden kann. Vor-  
teilhaft ist auch, dass das Gatedielektrikum gleichzei-  
tig auf den verschiedenen Bereichen thermisch oder  
durch Abscheidung erzeugt werden kann.

Des weiteren können an den nicht implantierten Berei-  
chen nach selektivem Entfernen der Si-Ge-Schicht 11  
konventionelle Si-basierende Bauelemente realisiert wer-  
den. Die dünne Si-Schicht 12 der Figur 7 kann als  
Template für eine weitere, bevorzugt selektive, Epita-  
xie von Silizium eingesetzt werden. Damit sind optimale  
Voraussetzungen für die Realisierung sehr unterschied-  
licher Bauelemente auf einem Chip geschaffen (System on  
a Chip).

Siebttes Ausführungsbeispiel: Verspanntes Silizium auf  
 $\text{SiO}_2$  mit Hilfe einer Si-Ge/Si-C/Si-Ge-Schichtenfolge  
auf SOI-Struktur

Es werden auf einem SOI-Substrat mit dünner Si-  
Oberflächenschicht mit einer Dicke von 5 Nanometern (o-  
der 15 Nanometern) mindestens drei epitaktische Schich-  
ten, bestehend aus einer ersten 80 Nanometer dicken Si-  
Ge-Schicht (20 atom% Ge), einer zweiten 10 Nanometer  
dicken Si-C-Schicht mit 0,75% C und einer weiteren 80  
Nanometer dicken Si-Ge-Schicht (20at % Ge) epitaktisch  
abgeschieden. Analog zu Figur 3 wird in der mittleren  
Schicht aus Si-C ein Defektbereich während der an-  
schließenden Temperaturbehandlung bei 1000°C geschaf-



fen, der die Relaxation der darunterliegenden und der darüberliegenden Si-Ge-Schicht bewirkt. Der Kohlenstoff wird in der dünnen Si-C Schicht in ausreichender Konzentration eingebaut. Durch die Temperaturbehandlung bei 1000°C wird die Si-C Schicht zu einem Defektbereich, der die Relaxation der darunter und der darüberliegenden Si-Ge-Schicht begünstigt. Die Si-Ge-Schichten relaxieren zu 90%. Entsprechend wird die dünne Si-Schicht des SOI-Substrats elastisch verspannt und eine verspannte Si-Schicht auf SiO<sub>2</sub> ist erzeugt.

#### Achtes Ausführungsbeispiel:

An Stelle einer ersten Schicht wird ein Schichtsystem verwendet, das aus einer dünnen Schicht, einer in der Zusammensetzung verschiedenen Schicht 11 (z.B. eine Si-C oder Si-Ge-Schicht mit anderer Konzentration) und einer weiteren Silizium-Schicht 12 und einer Schicht 13 (Si-C oder Si-Ge) bestehen (Figur 6). Für die Gesamtschichtdicke dieser drei Schichten gelten die gleichen Kriterien wie für die erste Schicht 4. Schicht 12 kann entweder zu einer verspannten Schicht transformiert werden oder einfach als Ätzstoppschicht verwendet werden. Die Verwendung einer zusätzlichen Ätzstoppschicht kann Oberflächenaufrauung während des Zurückätzens weitestgehend verhindern, da dann im letzten Ätzschritt nur noch eine sehr kleine Schichtdicke (Schicht 11) abgetragen werden muss bevor Schicht 3 bzw. 9 frei liegt. Schicht 4, 11 und 13 können beliebig verlaufende Konzentrationsprofile enthalten, um dadurch die Relaxation und die Defektdichte zu minimieren.

Das Verfahren bietet in einer weiteren, besonders vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung das Potential zur weiteren Reduktionen der Versetzungsdichte in der relaxierten und der verspannten Schicht.

5 Dies kann durch Ätzen von Gräben 15 in den Schicht 5, 4 und 3 (Schicht 5 kann vorher entfernt werden) mit Abständen von Mikrometern (1 bis 100  $\mu\text{m}$ ) oder vorteilhafter, durch Ätzgräben, die an die Bauelementstrukturen (Figur 7) angepasst sind, und nachfolgendes Tempern bei  
10 Temperaturen über 450°C, insbesondere über 650 °C erzielt werden.

Ein weiteres geeignetes Verfahren zur Reduktion der Versetzungsdichte ist das Aufbringen auf einer verspannten Schicht auf Schicht 4, nachdem diese durch Im-  
15 plantation und Temperaturbehandlung größtenteils relaxiert worden ist. Zur weiteren Relaxation einer Si-Ge Schicht eignet sich eine druckverspannte Schicht z. B. eine Siliziumnitridschicht (z. B. 100 Nanometer), die in einem PE-CVD-Reaktor deponiert worden ist. Eine an-  
20 schließende Temperaturbehandlung (Tempern in inerter oder reaktiver Atmosphäre) führt zu einer höheren Relaxation der Si-Ge Schicht und somit zu einer höheren Verspannung der Si-Schicht. Gleichzeitig wird die Versetzungsdichte reduziert. Dieses Verfahren kann auch an  
25 vorher strukturierten Flächen (Figur 7) angewandt werden.

Figur 9 zeigt einen MOSFET mit silizidiertem Kontakt 16 (z. B. Source), Gate-Dielektrikum 17, Gate-Kontakt 18, z. B. poly-Si oder Metall, Gate Kontakt 19, z.B. Sili-  
30 zid, Spacerisolation 20, silizidierter Drainkontakt 21

und raised drain contact 22 (hoch dotiertes Si oder Si-Ge).

## Bezugszeichenliste:

- 1 Silizium
- 2  $\text{SiO}_2$
- 3 Zu verspannende Schicht mit einer Schichtdicke  $d_3$
- 5 4 Epitaktische Schicht, optional mit Konzentrationsgradienten (gradiert) mit einer Schichtdicke  $d_4$ , die während des Verfahrens relaxiert wird.
- 5 Epitaktische Schicht 5 (z.B. Silizium) mit Schichtdicke  $d_5$
- 10 6 Maske
- 7 Defektbereich, der z. B. durch Ionenimplantation erzeugt wird. Das Maximum der Reichweite der Ionen liegt im einem Abstand  $d_6$  von der Grenzfläche der Schichten 4 und 5. Im Falle von Wasserstoff und Helium Ionen entstehen in dieser Tiefe Platelets, Bläschen oder Mikrorisse, die Defekte ausstoßen, wie Versetzungen.
- 15 8 Schutzschicht, z. B.  $\text{SiO}_2$
- 9 verspannte Schicht bzw. Bereich, z. B. verspanntes Silizium
- 20 10 epitaktische Schicht, die auf der nicht verspannten 3 bzw. verspannten Schicht 9 abgeschieden wird, z. B. aus Si oder Si-Ge- oder Si-Ge-C oder Si-C. Durch Deposition von Silizium wird die Schichtdicke des verspannten Siliziums vergrößert.
- 25 11 epitaktische Schicht, z. B. Si-Ge, Si-C oder Si-Ge-C, die relaxiert wird.

12 dünne epitaktische Schicht, die verspannt werden soll oder als Ätzstoppschicht dient, z. B. aus Silizium.

5 13 epitaktische Schicht z. B. gradiert, die relaxiert werden soll, z.B. Si-Ge oder Si-C oder Si-Ge-C.

14 Shallow Trench Isolation, ein mit Isolatormaterial aufgefüllter Ätzgraben 15.

15 Ätzgraben mit einer Tiefe bis zur Isolatorschicht 2 des SOI-Substates 1, 2, 3.

10 16 Silizidierter Kontakt, z. B. Source

17 Gate-Dielektrikum

18 Gate-Kontakt z. B. poly-Si oder Metall

19 Gate Kontakt z. B. Silizid

20 Spacerisolation

15 21 silizidierter Drainkontakt

22 raised drain contact (hoch dotiertes Si oder Si-Ge)

## P a t e n t a n s p r ü c h e

- 
1. Verfahren zur Herstellung einer verspannten Schicht  
(9) auf einem Substrat (1, 2) mit den Schritten:
    - Erzeugung eines Defektbereichs (7) in einem zu  
der zu verspannenden Schicht (3) benachbarten  
5 Schicht (2, 4, 5, 11),
    - Relaxation mindestens einer zu der zu verspannen-  
den Schicht (3) benachbarten Schicht (4, 11).
  2. Verfahren nach Anspruch 1,  
bei dem Versetzungen gebildet werden, die zur Rela-  
10 xation mindestens einer zu der zu verspannenden (3)  
Schicht benachbarten Schicht (4, 11) führen.
  3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die Schichtstruktur zur Relaxation mindestens einer  
15 Temperaturbehandlung und / oder Oxidation unterzo-  
gen wird.
  4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
auf der zu verspannenden Schicht (3) epitaktisch  
20 wenigstens eine erste Schicht (4; 11) aufgebracht  
wird.
  5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die erste Schicht (4; 11) einen anderen Verspan-  
25 nungsgrad aufweist als die zu verspannende Schicht  
(3).

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  
in der ersten Schicht (4; 11) der Defektbereich (7) erzeugt wird.
- 5 7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen Substrat (1, 2) und der zu verspannenden Schicht (3) eine weitere relaxierende Schicht angeordnet wird.
- 10 8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  
der Defektbereich (7) im Substrat erzeugt wird.
- 15 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  
der Defektbereich (7) in der zu verspannenden Schicht (3) selbst erzeugt wird.
- 20 10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  
zwei zu einer zu verspannenden Schicht (12) benachbarte Schichten (11, 13) einen anderen Verspannungsgrad aufweisen als die zu verspannende Schicht (12).
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem mehrere Schichten (11, 13) relaxieren.
- 25 12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere zu verspannende Schichten (3, 12) verspannen.

- 5 13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf der ersten Schicht (4, 11) epitaktisch wenigstens eine weitere Schicht (5; 12, 13) mit jeweils unterschiedlicher Gitterstruktur aufgebracht werden.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Defektbereich (7) in der zweiten Schicht (5; 13) erzeugt wird.
- 10 15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auf der zu verspannenden Schicht (3) wenigstens eine gradierte Schicht als erste Schicht (4) aufgebracht wird.
- 15 16. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass ein an der zu verspannenden Schicht (3) angeordneter Bereich der gradierten Schicht (4) einen anderen Verspannungsgrad aufweist als die zu verspannende Schicht (3).
- 20 17. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einer gradierten Schicht (4) ein Defektbereich (7) erzeugt wird.
- 25 18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem eine epitaktische Schichtstruktur umfassend mehrere Schichten auf einem Substrat (1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13) in einem Abscheideprozess hergestellt werden.



19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine Temperaturbehandlung, wodurch die erste Schicht (4, 11) relaxiert.
- 5 20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für die Temperaturbehandlung eine Temperatur zwischen 550 und 1200°C gewählt wird.
- 10 21. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für die Temperaturbehandlung eine Temperatur zwischen 700 und 980°C gewählt wird.
22. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturbehandlung in einer inerten Atmosphäre ausgeführt wird.
- 15 23. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturbehandlung oder einer reduzierenden oder oxidierenden oder nitridierenden Atmosphäre und insbesondere in Stickstoff ausgeführt wird.
- 20 24. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Relaxation in einem begrenztem Bereich einer Schicht herbeigeführt wird.
- 25 25. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche bei dem eine Maske (6) angeordnet wird.

26. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Defektbereich (7) durch Ionenimplantation erzeugt wird.
- 5 27. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass für die Implantation Wasserstoff- oder He-Ionen gewählt werden.
- 10 28. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Wasserstoff- oder He-Ionen mit einer Dosis von  $3 \times 10^{15}$  bis  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , insbesondere mit einer Dosis von 0,5 bis  $2,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  implantiert werden.
29. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für die Implantation Si-Ionen gewählt werden.
- 15 30. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass Si-Ionen mit einer Dosis von etwa  $0,5 \times 10^{14}$  bis  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  implantiert werden.
- 20 31. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für die Implantation Kohlenstoff-, Stickstoff-, Fluor-, Bor-, Phosphor-, Arsen-, Germanium-, Antimon-, Schwefel-, Neon-, Argon-, Krypton und / oder Xenon-Ionen gewählt werden.
- 25 32. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Implantationen durchgeführt werden.

33. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wasserstoff-Implantation in Verbindung mit einer Helium-Implantation durchgeführt wird.
- 5 34. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Bor-Implantation in Verbindung mit einer Wasserstoff-Implantation durchgeführt wird.
- 10 35. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Implantationen zur Erzeugung zweier Defektbereiche in der ersten Schicht (4) und in der zweiten Schicht (5) durchgeführt werden.
- 15 36. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Wafer während der Ionenimplantation in einem Winkel von größer  $7^\circ$ , insbesondere in einem Winkel von  $30-60^\circ$  gekippt wird.
- 20 37. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen zwei Implantationen eine Temperaturbehandlung durchgeführt wird.
- 25 38. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Defektbereich (7) durch eine Veränderung der Temperatur bei der Anordnung einer der Schichten (4, 5; 11) hergestellt wird.

39. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Defekte in einer Si-C-Schicht durch Temperaturbehandlung erzeugt werden.
- 5 40. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als Substrat eine amorphe Schicht, insbesondere ein Isolator (2) gewählt wird.
- 10 41. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein SOI-Substrat (1, 2, 3) als Grundstruktur für das Substrat gewählt wird.
- 15 42. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Silizium-Deckschicht (3) des SOI-Substrats (1, 2, 3) die zu verspannende Schicht (3), und das SiO<sub>2</sub> des SOI-Substrats (1, 2, 3) den Isolator (2) auf einem Substrat (1) darstellt.
- 20 43. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein SIMOX oder BESOI-Substrat als Grundstruktur für das Substrat gewählt wird.
44. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl eines Silicon on Sapphire als Grundstruktur für ein Substrat.
- 25 45. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl eines Substrates, das bei

den zur Relaxation erforderlichen Temperaturen viskos wird.

- 5 46. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass SiO<sub>2</sub>, Glas, SiC, Si-Ge, Graphit, Diamant, Quarzglas, GdGa-Granate, III-V Halbleiter und III-V-Nitride als Material für das Substrat (1, 2) gewählt wird.
- 10 47. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem ein Isolator (2) auf einem Substrat (1) gewählt wird.
- 15 48. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl von Si-Ge, oder Si-Ge-C oder Si-C als Material für die erste Schicht (4), die auf der zu verspannenden Schicht (3) angeordnet wird.
49. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl von Silizium als Material für die zu verspannende Schicht (3).
- 20 50. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl von Silizium als Material für die zweite Schicht (5), die auf der ersten Schicht (4) angeordnet wird.
- 25 51. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl von Si-Ge als Material für eine gradierte Schicht.

52. Verfahren nach vorhergehendem Anspruch,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Germanium-  
konzentration in der gradierten Schicht von der  
Grenzfläche an die zu verspannende Schicht (3) bis  
5 zu Oberfläche der gradierten Schicht abnimmt.
53. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Germaniumkonzen-  
tration in einer Si-Ge-Schicht an der Grenzfläche  
an die zu verspannende Schicht (3) 100 Prozent auf-  
10 weist.
54. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Gesamtschichtdicke  
der Schichtstruktur so gewählt wird, dass während  
des Wachstums von aufgetragenen Schichten (4; 11,  
15 13) diese keine merkliche Relaxation erfahren.
55. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Versetzungsdichte  
nach dem Wachstum kleiner als  $10^5 \text{ cm}^{-2}$  beträgt.
56. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
20 dadurch gekennzeichnet, dass eine zu verspannende  
Schicht (3) mit einer Dicke  $d_3$  im Bereich von 1 bis  
50 Nanometer gewählt wird.
57. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass eine zu verspannende  
25 Schicht (3) mit einer Dicke  $d_3$  im Bereich von 5 bis  
30 Nanometer gewählt wird.

58. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine erste Schicht (4) mit einer Dicke  $d_4$  nahe der kritischen Schichtdicke gewählt wird.
- 5 59. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch Wahl eines Schichtdickenverhältnisses  $d_4/d_3$  von größer gleich 10.
60. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine zweite Schicht  
10 (5) mit einer Dicke  $d_5 = 50-1000$  Nanometer gewählt wird.
61. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine zweite Schicht  
15 (5) mit einer Dicke  $d_5 = 300-500$  Nanometer gewählt wird.
62. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die zu verspannende Schicht (3) lokal verspannt.
63. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
20 dadurch gekennzeichnet, dass die zu verspannende Schicht (3) in den Bereichen, die vertikal in einer Ebene mit dem Defektbereich liegen lokal verspannt.
64. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
25 in einem Abstand von 50 bis 500 Nanometer von der zu relaxierenden Schicht erzeugt wird.

65. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Defektbereich (7) in einem Abstand von 50 bis 500 Nanometer oberhalb der auf der zu verspannenden Schicht (3) angeordneten Schicht (4) erzeugt wird.
- 5
66. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die erste und die zweite Schicht (4, 5; 11, 12, 13) nach Erzeugung der verspannten Schicht (9) oder nach Erzeugung eines verspannten Bereiches entfernt werden.
- 10
67. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Ätzen, insbesondere nasschemisches materialselektives Ätzen verwendet wird.
68. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem Ätzgräben (15) in der Tiefe der Schichten (2, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13) hergestellt werden.
- 15
69. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass nach Herstellung der Ätzgräben (15) eine Relaxation der Schicht (4; 11) oder weiterer Schichten, insbesondere durch Temperaturbehandlung herbeigeführt wird.
- 20
70. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Gräben (15) zur Herstellung von shallow trench isolationen (14) mit isolierendem Material aufgefüllt werden.
- 25
71. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine weite-



re Temperaturbehandlung zur Relaxation einer oder mehrerer Schichten durchgeführt wird.

- 5 72. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine verspannte Schicht (9) und / oder eine unverspannte Schicht (3) mit einer Oberflächenrauigkeit von kleiner als 1 Nanometer erzeugt wird.
- 10 73. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Oberflächenrauigkeit von Schichten (3, 9) durch Wachstum eines thermischen Oxids weiter verringert wird.
- 15 74. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an einem verspannten Bereich der Schicht (9) ein n- und / oder p-MOSFET hergestellt wird.
- 20 75. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine weitere epitaktische Schicht (10) umfassend Silizium oder Silizium-germanium (Si-Ge) oder eine Si-Ge-C-Schicht oder eine Germaniumschicht abgeschieden wird.
- 25 76. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an verspannten Silizium-germanium- (SiGe-)Bereichen (11) als weitere epitaktische Schichten oder als nicht relaxierte Schichtstruktur p-MOSFETs hergestellt werden.
77. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass an unverspannten Be-

reichen (3) der zu verspannenden Schicht (3) Bipolar-Transistoren prozessiert werden.

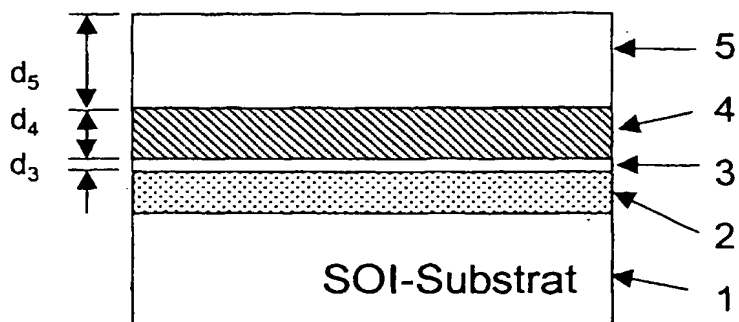
- 5 78. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Herstellung von Bipolar-Transistoren Siliziumgermanium-Schichten aufgebracht werden.
- 10 79. Verfahren zur Herstellung einer Schichtstruktur umfassend mehrere verspannte Schichten dadurch gekennzeichnet, dass einer oder mehrere der in den Ansprüchen 1 bis 78 genannten Verfahrensschritte mehrfach angewendet wird.
- 15 80. Schichtstruktur umfassend eine Schicht (9, 3) auf einem Substrat (1, 2), dadurch gekennzeichnet, dass die Schicht (9, 3) zum Teil verspannt ausgebildet ist.
- 20 81. Schichtstruktur nach vorhergehendem Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass der verspannte Bereich (9) der Schicht (9, 3) in einer Ebene planar neben dem unverspannten Bereich (3) der Schicht (9, 3) angeordnet ist.
- 25 82. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 oder 81, bei dem mindestens eine relaxierte Schicht (4, 11) auf und / oder unter mindestens einer verspannten Schicht (9) angeordnet ist.
83. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 82,

dadurch gekennzeichnet, dass jeweils planar in einer Ebene einer Schicht ohne Stufenbildung ein entgegengesetzt verspannter Bereich des selben Schichtmaterials angeordnet ist.

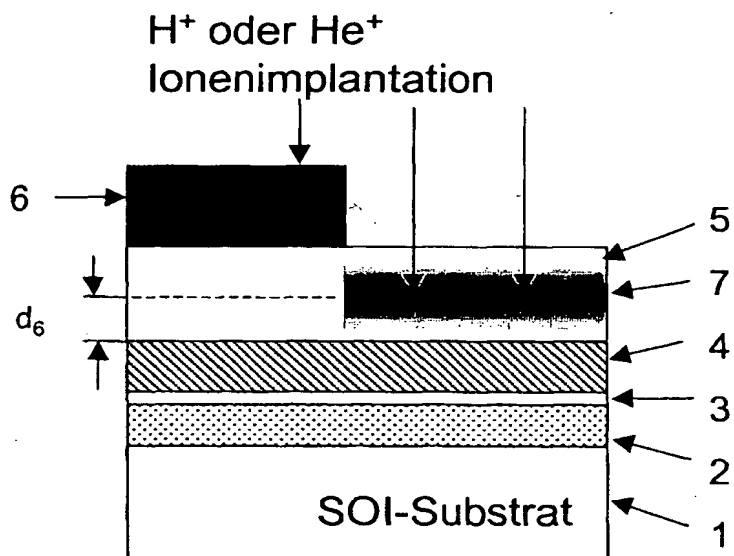
- 5        84. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 83,  
gekennzeichnet durch einen Isolator (2) als Substrat.
- 10       85. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 84,  
dadurch gekennzeichnet, dass die verspannte Schicht (9) und / oder die unverspannte Schicht (3) eine Defektdichte kleiner als  $10^7 \text{ cm}^{-2}$  aufweist.
- 15       86. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 85,  
dadurch gekennzeichnet, dass die verspannte Schicht (9) und / oder die unverspannte Schicht (3) eine Defektdichte kleiner als  $10^5 \text{ cm}^{-2}$  aufweist.
- 20       87. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 86,  
dadurch gekennzeichnet, dass mindestens eine verspannte Schicht (9) und / oder mindestens eine unverspannte Schicht (3) eine Oberflächenrauigkeit von kleiner als 1 Nanometer aufweist.
- 25       88. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 87,  
dadurch gekennzeichnet, dass auf der verspannten

Schicht (9) und / oder der unverspannten Schicht (3) weitere epitaktische Schichten (10, 11, 12, 22) angeordnet sind.

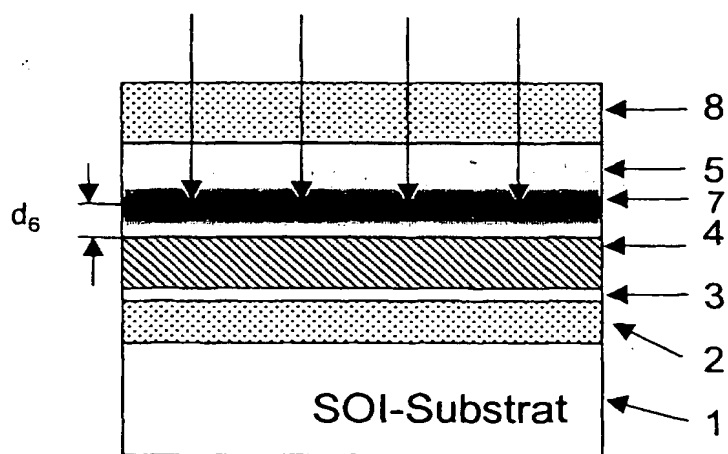
- 5 89. Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 88, dadurch gekennzeichnet, dass im verspannten Bereich (9) Isolationsbereiche (14) angeordnet sind.
90. Bauelement umfassend eine Schichtstruktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 80 bis 89.
- 10 91. Transistor, insbesondere ein modulated doped Feldeffekt-Transistor (MODFET) oder ein metal-oxide-semiconductor Feldeffekt-Transistor (MOSFET) als Bauelement nach Anspruch 90.
- 15 92. Fully depleted MOSFET als Bauelement nach Anspruch 90.
93. Tunnelodiode, insbesondere eine Siliziumgermanium-(Si-Ge)-Tunnelodiode als Bauelement nach Anspruch 90.
- 20 94. Silizium-Germanium-Quanten-Kaskaden-Laser als Bauelement nach Anspruch 90.
95. Photodetektor als Bauelement nach Anspruch 90
96. Leuchtdiode als Bauelement nach Anspruch 90.



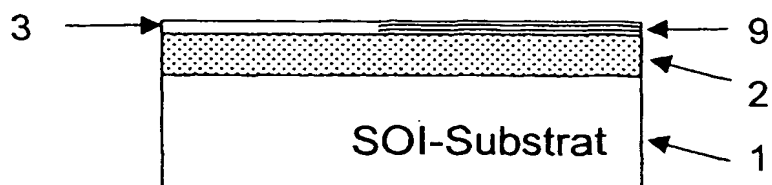
Figur 1



Figur 2



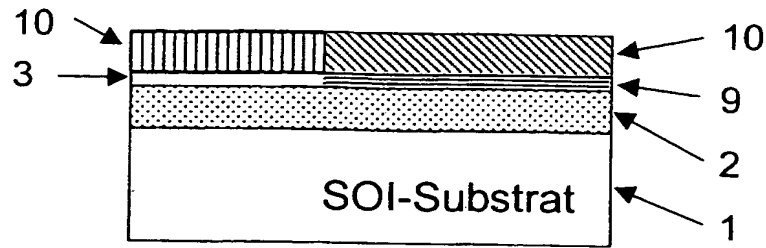
Figur 3



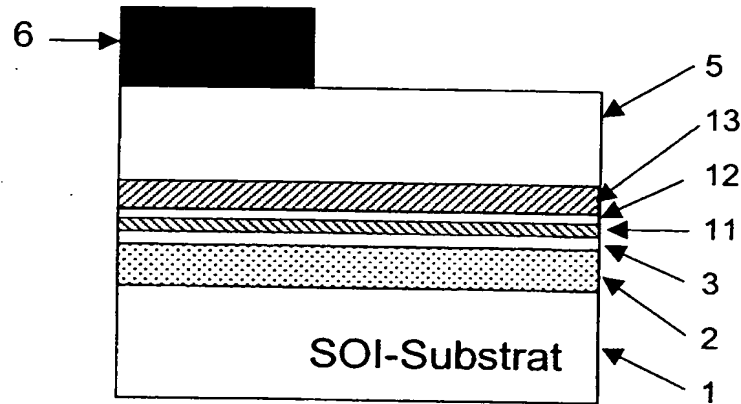
Figur 4

JC20 Rec'd P&M TO 20 OCT 2003

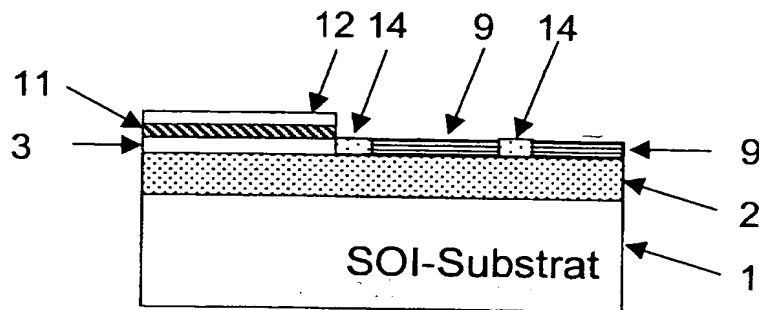
**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



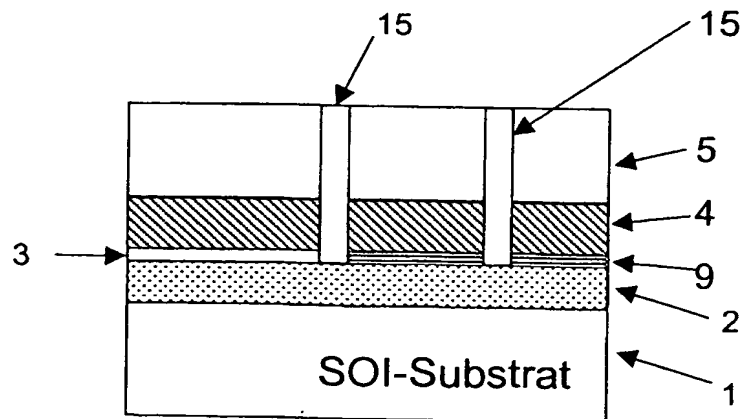
Figur 5



Figur 6



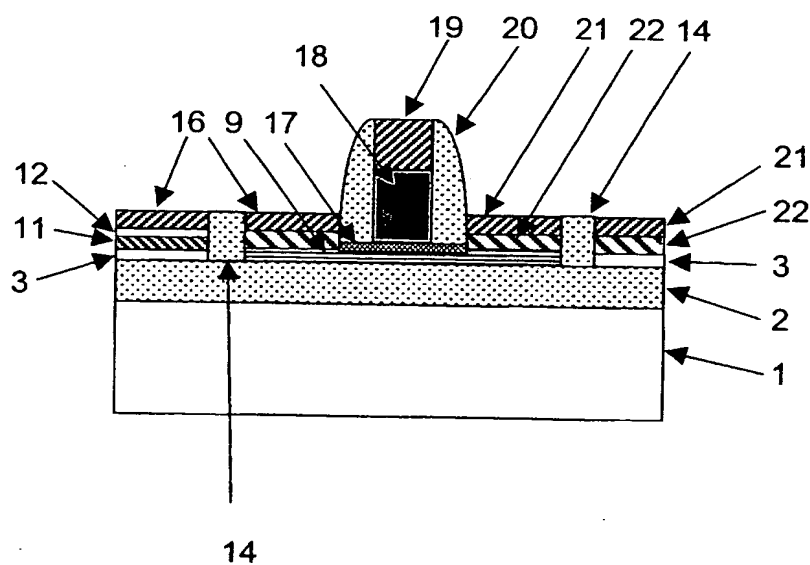
Figur 7



Figur 8







Figur 9

1620 Rec'd PETATO 20 OCT 2001

THIS PAGE BLANK (USPTO